

بررسی رفتار الکترونیکی یک مدار دیودی در معرض تابش برای آشکارسازی پرتوهای گاما

احمد رمضانی مقدم^۱ و محمد نظیفی فرد^{۲*}

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

^۲ پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

* اصفهان، کاشان، بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی، کدپستی: ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷

پست الکترونیکی: nazifi@kashanu.ac.ir

چکیده

پرتوهای یون ساز می توانند آثار دائمی یا موقت بر عملکرد مدارهای الکترونیکی داشته باشند. آثار موقت که در حین تابش دهی ظاهر شوند، می توان به عنوان نشانه ای از وجود پرتو یون ساز در محیط دانست که برای آشکارسازی پرتو یون ساز مفید هستند. در این مطالعه، اثر فوتون های گاما بر جریان معکوس دیود در حالت بایاس معکوس و مقایسه آن با همان جریان در حالت بدون تابش مورد بررسی قرار گرفت تا از این طریق، امکان به کارگیری پیوند دیودی برای مصارف آشکارسازی بررسی شود. در مدار دیودی از یک دیود N4001 به صورت سری با یک مقاومت بزرگ استفاده شده است. برای تأمین پتانسیل خارجی مدار دیودی از یک منبع تغذیه ولتاژ مستقیم گردید. برای اندازه گیری جریان اشباع معکوس و تغییرات جریان ناشی از تابش پرتو گاما، ولتاژ در دو سر مقاومت اندازه گیری شد. نتایج نشان می دهند که یک مدار ساده دیودی تحت تأثیر تابش گاما دارای اختلاف معناداری در جریان اشباع معکوس خود، نسبت به حالت بدون تابش است؛ بنابراین، می توان تغییرات مشاهده شده در جریان اشباع معکوس را در گام ساده اول، به عنوان علامت وجود پرتو گاما در محیط در نظر گرفت.

کلیدواژه‌گان: مدار دیودی، پرتو دهی گاما، کبالت ۶۰، سزیم ۱۳۷، آشکارسازی پرتو یون ساز.

۱. مقدمه

الکترونیکی در راکتورهای هسته ای و همچنین شتاب دهنده ها است. همچنین پس از آنکه مدارهای الکترونیکی در ماهواره های فضایی نیز به کار رفته شدند، آثار تابش های کیهانی بر عملکرد و همچنین ساختار اجزای الکترونیکی مشاهده شد. با توجه به اهمیت مطالعه اثر تابش های یون ساز و غیر یون ساز بر روی عناصر الکترونیکی، مطالعه های گسترده ای توسط کشورهای مختلف در این زمینه آغاز شده است؛ البته با توجه به تنوع بالای ادوات و مدارهای الکترونیکی و همچنین تنوع در سازوکار پرتو با مواد مختلف، تحقیقات در این زمینه در مراحل ابتدایی خود است [۳ و ۴]. به طور کلی، با توجه به

تأثیرات پرتوهای یون ساز بر عملکرد مدارهای الکترونیکی برای اولین بار، هم زمان با آزمایش های بمب هسته ای در سال ۱۹۵۴ کشف شد. اختلال در عملکرد مدارهای الکترونیکی و همچنین تغییر شکل و اعوجاج سیگنال های الکترونیکی تولید شده در دستگاه های اندازه گیری الکترونیکی به کار رفته در این آزمایش های اتمی، از اولین آثار تابش های مشاهده شده پرتوهای هسته ای بر مدارهای الکترونیکی بوده است [۱-۳]. از موارد دیگر اثر پرتوهای یون ساز بر مدارهای الکترونیکی که می توان به آن اشاره کرد، رفتار مدارها و حسگرهای

مستقیم، ولتاژ شکست معکوس، جریان نشتی در بایاس معکوس و سرعت قطع و وصل دیود است [۴-۶]. در این پژوهش، به بررسی تجربی اثر فوتون‌های گاما بر جریان عبوری از دیود در حالت بایاس معکوس و مقایسه آن با جریان اشباع معکوس در حالت بدون تابش (قبل و بعد از تابش) پرداخته می‌شود تا از این طریق، امکان به‌کارگیری پیوند دیودی برای مصارف دزیمتری بررسی شود. برای این منظور، مطابق شکل (۱)، از یک دیود N4001 به‌صورت سری با یک مقاومت استفاده شده است. برای تأمین پتانسیل خارجی مدار دیودی از یک منبع تغذیه ولتاژ مستقیم گردید. برای اندازه‌گیری جریان دیود در حالت بایاس معکوس و تغییرات ناشی از تابش پرتو گاما، ولتاژ در دو سر مقاومت اندازه‌گیری شد که براساس قانون اهم، به جریان عبوری از دیود مرتبط است. از آنجاکه امکان حضور در اتاق پرتودهی وجود ندارد، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط یک ثبات در حین پرتودهی ذخیره شد. مدار الکترونیکی پس از پیاده‌سازی، ابتدا مورد تست و ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مختلف، از جمله مقدار جریان اشباع معکوس در محیطی با دمای ثابت اندازه‌گیری شد. سپس در شرایط کاری مشابه، مطابق شکل (۲)، مدار الکترونیکی در معرض پرتودهی قرار داده شد و پارامترهای ذکر شده حین پرتودهی مدار، به‌صورت هم‌زمان با پرتودهی اندازه‌گیری شد و با مقادیر آن در حالت عادی مقایسه گردید. شایان ذکر است ولتاژ دو سر مقاومت R_s به‌عنوان متغیر وابسته به دز، با استفاده از یک اسیلوسکوپ حافظه‌دار اندازه‌گیری شد و مقدار مؤثر ولتاژ در حالت قبل و در حین تابش دهی با یکدیگر مقایسه گردید. ثبت داده‌ها برای تجزیه و تحلیل توسط یک ثبات داده‌ها انجام پذیرفته است.

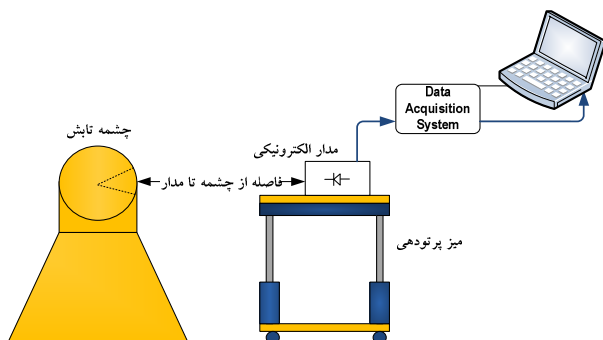
میزان انرژی و نوع پرتو یونساز، پدیده‌های فیزیکی متفاوتی در رابطه با عناصر الکترونیکی قابل مشاهده است. برخورد پرتوهای یونساز با عناصر الکترونیکی ممکن است منجر به ایجاد آثار موقتی، از جمله تغییرات جریان مستقیم یا معکوس در پیوند الکترونیکی گردد یا اینکه منجر به تغییر دائمی خواص فیزیکی و الکترونیکی عنصر نیمه‌هادی شود [۵ و ۶]. در این مطالعه، به بررسی آثار موقت ناشی از تابش پرتوهای گاما پرداخته شده تا بتوان از آن به‌عنوان روشی برای آشکارسازی پرتوهای یونساز استفاده کرد. در این مطالعه، آثار تابش پرتوهای گامای ساطع شده از چشمه‌های کبالت -۶۰ و سزیم -۱۳۷ بر رفتار دیود در حالت بایاس معکوس، بررسی شد.

۲. روش انجام کار

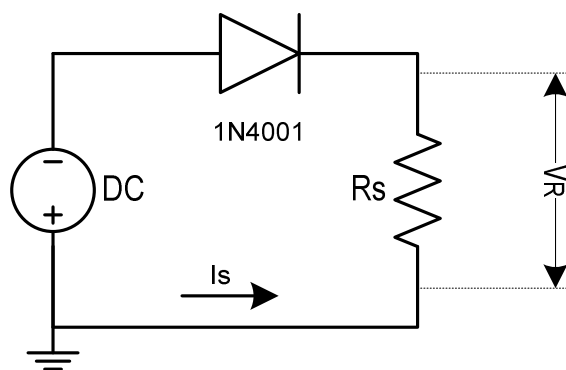
۲-۱. طراحی و پیاده‌سازی مدار الکترونیکی به‌منظور بررسی

اثر تابش گاما

ابتدا مدار دیودی مناسب طراحی و پیاده‌سازی شد. دیود یکی از عناصر الکترونیکی پایه و پرکاربرد در میان ادوات الکترونیکی است که از اتصال دو نوع نیمه‌هادی از نوع n و p تشکیل می‌شود. از لحاظ الکترونیکی، یک دیود هنگامی جریان را از خود عبور می‌دهد که ولتاژ آستانه در جهت مستقیم دو سر آن اعمال شده باشد. در دیودهای سیلیکون ولتاژ آستانه - مقدار ولتاژی که باعث می‌شود تا دیود شروع به هدایت جریان الکترونیکی کند، حدود $0/6$ تا $0/7$ ولت است [۳]. دیود در بایاس معکوس، جریان بسیار کمی از خود عبور می‌دهد که به جریان نشتی معروف است و در حدود چند میکرو آمپر یا حتی کمتر است. پارامترهای مختلفی جهت بررسی اثر تابش پرتوهای یونساز بر دیود قابل بررسی هستند که شامل پارامترهایی نظیر افت ولتاژ دیود در بایاس مستقیم (ولتاژ درگاهی یا ولتاژ شروع هدایت)، حداکثر جریان در بایاس



شکل ۲: شماتیک سیستم پرتودهی مورد استفاده



شکل ۱: شماتیک مدار دیودی برای انجام آزمایش‌های پرتودهی

۳. نتایج و بحث

میزان حداکثر تغییرات جریان اشباع معکوس (مقدار مؤثر جریان) در ولتاژ بایاس ۳۰ ولت و مقاومت R_s برابر ۵ مگا اهم که حین پرتودهی دیود نسبت به قبل از آن اندازه‌گیری شد که در جدول (۱) نمایش داده شده است. به‌طور کلی، فوتون‌های یون‌ساز پس از برخورد با عناصر نیمه‌هادی می‌توانند دو اثر مختلف بر روی آن داشته باشند که شامل اثر یونیزاسیون و تخریب ناشی از جابجایی است؛ بنابراین، تابش‌های یون‌ساز می‌تواند منجر به تغییر خواص الکترونیکی یا تغییر در عملکرد مدار این عناصر شوند. با توجه به انرژی پرتو ساطع شده رخداد پدیده‌های مختلف شامل اثر فوتوالکتریک، اثر کامپتون و همچنین تولید زوج محتمل است. در واقع، هنگامی که باریکه‌ای تک‌فام از پرتوهای گاما از یک محیط عبور می‌کند، تعدادی از فوتون‌های باریکه در محیط دستخوش برهم‌کنش می‌شوند که طی آن، تمام یا بخشی از انرژی خود را به محیط تحت تابش منتقل می‌کنند. برهم‌کنش‌های مذکور باعث یک کاهش نمایی در شدت پرتوها هنگام عبور از ماده می‌شوند.

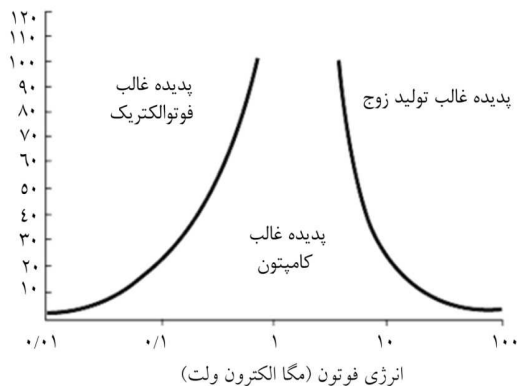
در پدیده فوتوالکتریک فوتون تمام انرژی خود را در محیط از دست می‌دهد و باعث کنده‌شدن الکترون مقید محیط می‌شود که آن را فوتوالکترن می‌نامند. بخش عمده انرژی منتقل شده از فوتون به شکل انرژی جنبشی فوتوالکترن‌های تولیدی ظاهر می‌شود. احتمال انجام این پدیده به‌شدت به انرژی فوتون و

۲-۲. سیستم پرتودهی

به‌منظور پرتودهی، از چشمه‌های کبالت ^{60}Co و سزیم ^{137}Cs مستقر در واحد پرتودهی دانشگاه کاشان استفاده شد. چشمه کبالت مورد استفاده در آزمایش‌های پرتودهی آهنگ دزی معادل $222 \mu\text{G/h}$ در فاصله 50 cm دارد و پرتوهای گامایی با انرژی‌های 1117 MeV و 1332 MeV از خود ساطع می‌کند. چشمه سزیم نیز آهنگ دزی معادل $293 \mu\text{G/h}$ در فاصله 50 cm دارد که پرتوهای گامایی با انرژی 662 KeV از خود ساطع می‌کند. به‌منظور پرتودهی نمونه، مطابق شکل (۲) مدار الکترونیکی بر روی میز پرتودهی و در کمترین فاصله از چشمه قرار گرفت تا دیود حداکثر دز ممکن را از چشمه‌ها دریافت کند. مدت زمان تابش با استفاده از زمان‌سنج سیستم پرتودهی تنظیم شد و تمامی نمونه‌ها در مدت زمان و شرایط محیطی یکسان، مورد تابش قرار گرفتند. لازم است ذکر شود برای یافتن میدان پرتو، از یک چراغ لیزر که درون کالیماتور چشمه قرار گرفته بود، استفاده شد. با روشن شدن این چراغ، پنج چشمه لیزری، محدوده پرتودهی چشمه را مشخص می‌کنند. گفتنی است پرتودهی نمونه‌ها برای هر چشمه به‌صورت جداگانه انجام گرفت.

در باره فوتون‌های مورد بحث در این مقاله، می‌تواند از مرتبه چند کیلو الکترون ولت باشد. فوتون‌های جدید که انرژی کمتری از انرژی فوتون‌های اولیه دارند، به نوبه خود می‌توانند پدیده فوتوالکتریک را در محیط نیمه‌رسانا به راه اندازند. این عمل موجب جدایی الکترون از قید اتم می‌شود و به دلیل داشتن انرژی جنبشی، میزان رسانش محیط را افزایش می‌دهد [۲-۴].

عدد اتمی ماده جاذب



شکل ۳: وابستگی احتمال انجام پدیده‌های فوتوالکتریک، اثر کامپتون و همچنین تولید زوج به انرژی فوتون‌های فرودی و همچنین عدد اتمی ماده تحت تابش

همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از نیمه‌هادی از مرتبه چند الکترون ولت است؛ بنابراین، فوتون‌هایی با انرژی بسیار زیاد، مانند تابش ایکس و گاما، (از مرتبه چند مگا الکترون ولت) در مقایسه با انرژی پیوند الکترون‌های لایه آخر، قادر به تولید حامل بار در نیمه‌رسانا می‌شوند که حاصل پدیده‌های کامپتون و فوتوالکتریک است. تابش فوتون‌هایی با انرژی بیشتر از مقدار شکاف انرژی ماده می‌تواند توسط اتم‌های شبکه نیمه‌هادی در ناحیه تخلیه جذب شود و منجر به آزاد شدن یک زوج الکترون-حفره گردد که پس از تولید به سرعت توسط میدان خارجی از هم تفکیک می‌شوند و فرصت بازترکیب را نمی‌یابند. در بایاس مستقیم زوج آزاد شده نسبت به چگالی

همچنین عدد اتمی محیط تحت تابش بستگی دارد. در پدیده کامپتون، فوتون‌ها در برخورد با الکترون‌های نسبتاً آزاد محیط تحت تابش، بخشی از انرژی خود را به الکترون منتقل می‌کنند. احتمال انجام این پدیده به صورت ضعیفی به انرژی فوتون و همچنین عدد اتمی محیط تحت تابش بستگی دارد. پدیده تولید زوج که در آن یک فوتون هنگام عبور از کنار یک هسته سنگین نابود شده و یک زوج الکترون-پوزیترون به وجود آورده، برای پرتوهای گامای با انرژی بیش از 1.02 MeV و برای محیط‌های شامل اتم‌های سنگین اهمیت پیدا می‌کند.

جدول ۱: میزان حداکثر تغییرات جریان اشباع معکوس (میکرو آمپر) قبل و حین پرتودهی

نوع چشمه تابشی	سزیم ۱۳۷	کبالت ۶۰
جریان اشباع معکوس قبل از تابش دهی μA	$3/15 \pm 0/47$	$3/20 \pm 0/48$
جریان اشباع معکوس در حین تابش دهی μA	$3/41 \pm 0/51$	$3/43 \pm 0/52$
میزان افزایش جریان اشباع معکوس μA	$7/25$	$7/10$

شکل (۳) وابستگی احتمال انجام پدیده‌های فوتوالکتریک، اثر کامپتون و همچنین تولید زوج به انرژی فوتون‌های فرودی و همچنین عدد اتمی ماده تحت تابش بستگی را نشان می‌دهد. در مورد آزمایش انجام پذیرفته در این مقاله، با توجه به انرژی فوتون‌های گاما که از مرتبه 1 MeV هستند و با در نظر گرفتن عدد اتمی ماده تحت پرتودهی، پدیده غالب در برهم‌کنش گاما با ماده از نوع پدیده کامپتون است. در این پدیده، فوتون‌ها در برخورد با الکترون‌های آزاد محیط نیمه‌رسانا، بخشی از انرژی خود را به الکترون منتقل می‌کنند و فوتون جدیدی با انرژی کمتر از انرژی اولیه تولید می‌شود. انرژی منتقل شده به الکترون

که تابش یون ساز هنگام عبور از یک محیط نیمه‌رسانا می‌تواند حامل‌های آزاد ایجاد کند و ناحیه تهی در اتصال p-n تحت تأثیر این حامل‌ها قرار گیرد؛ به گونه‌ای که هدایت الکتریکی دیود افزایش یابد؛ بنابراین، افزایش جریان اشباع معکوس مشاهده شده ناشی از حامل‌های آزاد ایجاد شده در محیط نیمه‌رسانا است. با توجه به انرژی فوتون‌های گامایی و همچنین پایین بودن عدد اتمی نیمه‌رسانای مورد استفاده در این آزمایش، ایجاد حامل‌های مذکور بر اثر رخداد پدیده‌های کامپتون و فوتوالکتریک است. تغییر جریان معکوس اشباع مشاهده شده در حدود ۸ درصد است که به کمک یک مدار تقویت کننده به راحتی قابل تبدیل به پالس خروجی به شکل‌های متفاوت مانند جریان الکتریکی، نور یا صدا است؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که با طراحی یک مدار الکترونیکی مناسب، امکان ساخت یک آشکارساز حساس نسبت به پرتو گامای بسیار ارزان قیمت و قابل دسترس فراهم است.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان و همچنین دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان تشکر و قدردانی می‌کنند.

جریان بسیار ناچیز و به سادگی قابل نظر هستند. در بایاس معکوس تنها جریان موجود جریان اقلیت ناشی از تونل‌زنی است که مقدار بسیار اندکی دارد؛ بنابراین، آزاد شدن زوج‌های الکترون-حفره در جریان کلی می‌تواند تأثیرگذار و قابل اندازه‌گیری باشد.

جدول ۲: شکاف انرژی در چند نیمه‌هادی پر مصرف [۳]

انرژی شکاف (بر حسب الکترون ولت)		نوع ماده
صفر کلون	۳۰۰ کلون	
۱/۱۷	۱/۱۱	Si
۰/۷۴	۰/۶۶	Ge
۱/۴۲	۱/۲۷	InP
۱/۵۲	۱/۴۳	GaAs

۴. نتیجه‌گیری

تأثیرات موقت تابش گاما بر رفتار مدار الکترونیکی ساده شامل دیود به صورت تغییر در جریان عبوری از دیود در حالت بایاس معکوس معکوس ظاهر می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد

۵. مراجع

- [1] Chee, Fuei Pien, Abdul Amir, F. Haider, Saafie Salleh, and Azali Muhammad. "Effects of total ionizing dose on bipolar junction transistor." *American Journal of Applied Sciences* 7, no. 6 (2010): 807-810.
- [2] Johnston, A. H., G. M. Swift, and B. G. Rax. "Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 41, no. 6 (1994): 2427-2436.
- [3] Pease, R. L. "Total ionizing dose effects in bipolar devices and circuits." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 50, no. 3 (2003): 539-551.
- [4] Schmidt, D. M., A. Wu, R. D. Schimpf, D. M. Fleetwood, and R. L. Pease. "Modeling ionizing radiation induced gain degradation of the lateral PNP bipolar junction transistor." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 43, no. 6 (1996): 3032-3039.
- [5] Li, Xingji, Hongbin Geng, Chaoming Liu, Zhiming Zhao, Dezhuang Yang, and Shiyu He. "Combined radiation effects of protons and electrons on NPN transistors." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 57, no. 2 (2010): 831-836.
- [6] Liu, Chaoming, Xingji Li, Hongbin Geng, Zhiming Zhao, Dezhuang Yang, and Shiyu He. "Radiation

effects on bipolar junction transistors induced by 25MeV carbon ions." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 624, no. 3 (2010): 671-674.